Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Effect of Electric Field on the Performance of a Square Cyclone*

Research Article

Mahsa Fathi[1], Morteza Bayareh[2]

10.22067/jacsm.2024.88376.1265

Abstract

The separation of solid particles from the liquid or gas phase is commonly done using mechanical devices, the most important of which are cyclones. The simple structure and low production and maintenance costs have increased the use of cyclone separators in the electricity, petrochemical, cement, wood, etc. industries. The results demonstrate that the applied voltage, in addition to increasing the tangential and axial velocities, which causes an increase in the centrifugal force in the cyclone, stabilizes the flow and brings purer air into the vortex. The increase in efficiency and decrease in pressure drop due to the application of the electric field indicates an improvement in the performance of the studied cyclone.

Keywords: Particle separation, Square cyclone, Electric field, Separation efficiency, Pressure drop.

1. Introduction

Cyclones are used in various industries such as cement, plaster, steel, sugar, food, and pharmaceutical industries, and in the industries that somehow deal with dust particles known as one of the main and the lowest consumption of industrial ventilation system equipment [1-3]. Hoffman et al. [4] stated that the length of the natural vortex is strongly related to the process of particle separation and erosion that is observed at the base of conventional cyclone separators. In addition to cyclones with a cylindrical body, there is another type of cyclone called a square cyclone. In the present work, an electromagnetic force is applied to the cyclone body. The electric field is applied to the square cyclone by using a lithium-ion battery and the effect of the electric field on tangential velocity, axial velocity, and pressure distribution is investigated.

2- Governing equations

Since the fluid is Newtonian and the gas flow in the cyclone is assumed to be incompressible, the continuity and three-dimensional Reynolds averaged Navier-Stokes equations, ignoring the gravity force, are expressed as follows [5]:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} R_{ij} \qquad (2)$$

Here, $\bar{u}_i$ is the average velocity vector, x_i is the position vector, $\bar{P}$ is the average pressure, ρ is the gas density, ν is the gas kinematic viscosity, and R_{ij} is the Reynolds stress tensor. Previous studies have shown that the Reynolds stress model can be used to calculate the strain-stress rate for complex flow in cyclones [1]. Hence, this model is chosen for the present work.

Also, since the volume fraction of particles is less than 10%, one-way coupling is used to track solid particles [1]. According to the Eulerian-Lagrangian approach, Newton's second law for particle motion is as follows:

$$\frac{du_P}{dt} = F_D (u_A - u_P)_x \qquad (3)$$

$$F_D = \frac{18\mu_A}{\rho_P d_P^2}\frac{C_D Re_P}{24} \qquad (4)$$

$$C_D = C_1 + \frac{C_2}{Re_P} + \frac{C_3}{Re_P^2} \qquad (5)$$

$$Re_P = \frac{\rho_A d_P |u_P - u_A|}{\mu_A} \qquad (6)$$

Here, u_A is air velocity, u_P is particle velocity, μ_A is air viscosity, ρ_A is air density, ρ_P is solid particle density, d_P is particle diameter and Re_P is particle Reynolds number. C_D is the drag coefficient and C_1, C_2, and C_3 coefficients depend on Re_P. Fig. 1 shows cyclone geometry and Table 1 presents the dimensional characteristics.

3- Results

Tangential velocity

Tangential velocity is the most important velocity component in cyclone separators, which affects both pressure drop and separation efficiency. Separation of solid particles takes place due to centrifugal force and this force is directly related to the size of the tangential

*Manuscript received June 5, 2024. Revised June 30, 2024, Accepted July 31, 2024.

[1] Master, Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

[2] Corresponding author, Associate professor, Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

Email: m.bayareh@sku.ac.ir

velocity. The tangential velocity profile consists of two internal and external regions. In the inner region, which is almost rotating, it acts like the rotation of a solid body, which is called a forced vortex. Fig. 2 shows the effect of electric field on tangential velocity. In this figure, the input velocity is 25 m/s and the voltage value is variable from zero to 25 kV.

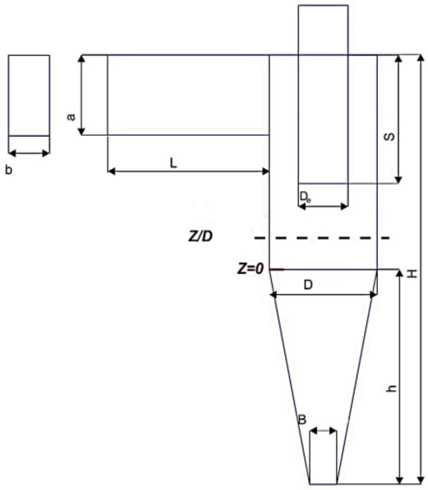


Fig. 1. Schematic of a square cyclone (D is the size of the side of the square body).

Table 1. Square cyclone dimensions (in millimeters).

D	D_e	a	b	s	h	H	B	Dimension
100	460	750	380	1000	2000	4000	250	

Axial velocity

Another important component of velocity that is responsible for transporting solid particles is axial velocity. The axial velocity increases near the center line in the region of the forced vortex. This velocity component reaches the lowest possible value in the free vortex region. Also, taking into account the reflective effects of the wall, the axial velocity of the inner core area decreases. Near the wall of the cyclone, the axial velocity moves the particles downwards (conical part and then the collection place). In the area near the wall, the flow is downward, which carries the particles with it. In the inner vortex area, the fluid flow without particles or with small particles is directed upwards towards the vortex detector. The increase in voltage causes a significant increase in the axial velocity (Fig. 3).

4. Conclusion

The purpose of this study is was numerically investigate the effect of an electric field on improving the efficiency of a square cyclone. The simulations were carried out using the Eulerian-Lagrangian method and one-way coupling, and the effect of voltage on two components of velocity, i.e., tangential velocity and axial velocity, as well as pressure drop, was investigated. The results showed that increasing the applied voltage increases the tangential velocity. The increase in centrifugal force resulting from the increase in tangential velocity moves the particle toward the cone wall and increases the concentration of particles in these areas.

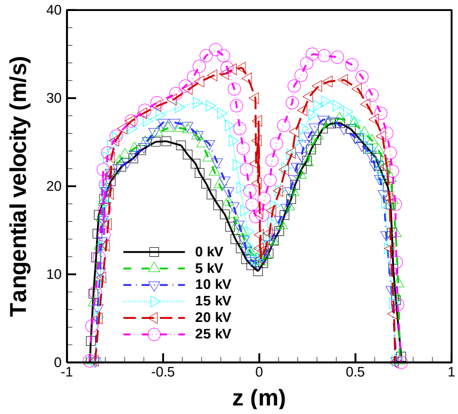


Fig. 2. The effect of the electric field on the size of the tangential velocity

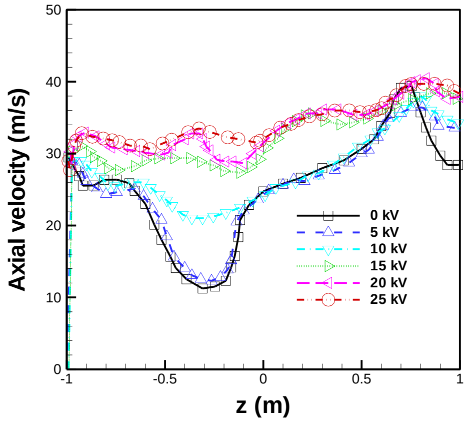


Fig. 3. The effect of the electric field on the size of the axial velocity

References

[1] E. Dehdarinejad, M. Bayareh, "An overview of numerical simulations on gas-solid cyclone separators with tangential inlet," *ChemBioEng Reviews*, vol. 8(4), pp. 375-391, (2021).

[2] E. Dehdarinejad, M. Bayareh, M. Ashrafizaadeh, "Impact of cone wall roughness on turbulence swirling flow in a cyclone separator," *Chemical Papers*, vol. 76, pp. 5579–5599, 2022. https://doi.org/10.1007/s11696-022-02261-6.

[3] I. Karagoz, F. Kaya, "CFD investigation of the flow and heat transfer characteristics in a tangential inlet cyclone," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 34, pp. 1119–1126, 2007. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.05.017.

[4] A.C. Hoffmann, R. De Jonge, H. Arends, C. Hanrats, "Evidence of the 'natural vortex length' and its effect on the separation efficiency of gas cyclones," *Filtration & Separation*, vol. 32 (8), pp. 799–804, (1995).

[5] K. Elsayed, C. Lacor, "Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical models and CFD simulations," *Chemical Engineering Science*,.vol. 65, no. 22, pp. 6048–6058, 2010. https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.08.042.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک
http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

اثر میدان الکتریکی بر عملکرد یک سیکلون مربعی*

مقاله پژوهشی

مهسا فتحی [۱] مرتضی بیاره [۲]

10.22067/jacsm.2024.88376.1265

چکیده جداسازی ذرات جامد از فاز مایع یا گاز غالبا با استفاده از دستگاه‌های مکانیکی انجام می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها، سیکلون‌ها هستند. ساختار ساده و هزینه‌های تولید و تعمیر و نگهداری کم باعث افزایش استفاده از جداکننده‌های سیکلون در صنایع برق، پتروشیمی، سیمان، چوب و ... شده است. هدف از این مطالعه بررسی اثر میدان الکتریکی بر عملکرد یک سیکلون مربعی‌شکل است. از روش تنش رینولدز برای مدل‌کردن جریان مغشوش استفاده می‌شود. برای ردیابی ذرات جامد از کوپلینگ یک‌راهه و برای مدل کردن جریان دوفازی از رویکرد اویلری-لاگرانژی بهره‌گیری خواهد شد. نیروی الکتریسیته توسط یک باتری لیتیوم -یونی به بدنه سیکلون اعمال شده و سرعت مماسی، سرعت محوری و افت فشار در ولتاژهای مختلف با هم مقایسه می‌شود. نتایج نشان دادند که نیروی الکتریسیته علاوه بر افزایش سرعت مماسی و سرعت محوری که باعث ازدیاد نیروی گریز از مرکز در سیکلون می‌شود، موجب پایدار شدن جریان شده و هوای خالص‌تری را وارد ورتکس‌یاب می‌کند. افزایش بازده و کاهش افت فشار در اثر اعمال میدان الکتریکی نشان‌دهنده بهبود عملکرد سیکلون موردمطالعه است. نیروی الکتریکی باعث می‌شود افت‌فشار ناشی از عبور جریان سیال از این دستگاه در مقایسه با حالت بدون الکتریکی به مراتب کمتر شود. در نتیجه، سیکلون مربعی قادر خواهد بود گستره وسیعی از ذرات را با بازده بالا و افت فشار کم جدا نماید.

واژه‌های کلیدی جداسازی ذرات، سیکلون مربعی، میدان الکتریکی، بازده جداسازی، افت فشار.

مقدمه

هدف بسیاری از عملیات در صنایع شیمیایی، نفت و گاز، نیروگاه های بزرگ، توربین‌های‌گازی و سیستم‌های احتراقی، بیولوژیکی و زیست‌محیطی، جداسازی اجزای یک محلول یا مخلوط از یکدیگر و یا دستیابی به یک ماده خالص از ترکیب دو یا چند جزء است. یکی از پرکاربردترین دستگاه‌های جداساز، سیکلون‌ها هستند. این دستگاه‌ها در صنایع مختلف مانند کارخانه سیمان، کارخانه‌های گچ، فولاد، قند، صنایع غذایی و دارویی و در همه صنایعی که به نحوی با ذرات گردوغبار سروکار دارند به عنوان یکی از اصلی‌ترین و کم استهلاک‌ترین تجهیزات سیستم تهویه صنعتی شناخته شده‌اند [1]. این دستگاه جداساز عموما قادر به جمع‌آوری ذرات درشت‌تر از ۱۰ میکرون با بازده ۹۰ درصد می‌باشد. سیکلون‌ها از تعداد قطعات کمی تشکیل شده‌اندکه عبارتند از: ورودی، خروجی، محفظه بیرونی، ورتکس‌یاب و محفظه‌ای برای جمع‌آوری گردوغبار. در این دستگاه‌ها، گاز وارد محفظه بیرونی شده و در یک مسیر حلقوی به حرکت خود ادامه می‌دهد. گاز در حال چرخش، مواد سنگین‌تر را به سمت دیواره‌های سیکلون پرتاب می‌کند. نزدیک دیواره به علت وجود اصطکاک، سرعت گاز کم می‌شود و موادی که به سمت دیواره پرتاب می‌شود در یک جریان با سرعت کم به دام می‌افتند و تحت‌تأثیر نیروی جاذبه به سمت پایین کشیده می‌شوند. گاز بدون مواد اضافه در یک مسیر مارپیچ به صورت معکوس به سمت بالا حرکت می‌کند و از سیکلون خارج می‌شود. به علت غلظت

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۳/۱۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۵/۱۷ می باشد.
(۱) کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد.
(۲) نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد.
Email: m.bayareh@sku.ac.ir

حجمی‌کم، حرکت ذرات معلق نسبت به گاز حامل تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی حرکت سیال نخواهند داشت [2].

سیکلون‌ها به طور کلی به دو دسته زیر تقسیم می‌شوند: جداکننده‌های تک‌سیکلونی و جداکننده‌های چندسیکلونی. جداکننده‌های تک‌سیکلونی، یک گردابه دوتایی (جفت) جهت جدا کردن ذرات درشت از ذرات ریز گرد و غبار ایجاد می‌کنند. گردابه اصلی به سمت پایین می‌چرخد و اکثر ذرات درشت گرد و غبار را با خود حمل می‌کند. گردابه داخلی نیز نزدیک به سیکلون ایجاد می‌شود و به طرف بالا چرخش کرده و ذرات ریزتر گرد و غبار را با خود حمل می‌کند. جداکننده‌های چند سیکلونی شامل تعدادی سیکلون با قطر کوچک‌تر هستند که به موازات هم عمل می‌کنند و ورودی و خروجی مشترک دارند. این سیکلون‌ها بر اساس همان اصول جداکننده‌های تک‌سیلکونی عمل می‌نمایند اما بازده بیشتری از تک سیکلون‌ها دارند زیرا بلندترند و قطر کوچک‌تری دارند که باعث می‌شود نیروی سانتریفوژی بیشتری ایجاد شود. هافمن و همکاران [3] و چن و همکاران [4] بیان کردند که طول گردابه طبیعی به شدت با فرایند جداسازی ذرات و فرسایش که در پایه جداکننده‌های معمولی مشاهده می‌شود، ارتباط دارد. یکی از مشکلات اصلی مربوط به طول ورتکس طبیعی، ثابت ماندن گردابه است، زیرا این پارامتر بسته به سرعت ورودی جریان و غلظت، یعنی چگالی فاز جامد در متر مکعب مخلوط گاز جامد تغییر می‌کند. آوکی و کاراگز [5] مطالعات بسیاری بر طول گردابه طبیعی انجام دادند و عنوان کردند که طول گردابه طبیعی تابعی از سرعت ورودی و زبری دیواره سیکلون است و بر میزان عملکرد و بازده سیکلون تأثیر زیادی دارد. لازم به ذکر است که در سیکلون‌های معمولی، منطقه مخروطی که دارای گردابه است، شتاب مماسی جریان را افزایش می‌دهد و در نتیجه افت فشار افزایش پیدا می‌کند. این بخش از سرعت افزوده در یک هندسه بدون منطقه مخروطی ناپدید می‌شود و بیشتر به کاهش کل افت فشار کمک می‌کند. وانگ و همکاران [6] روابط هندسی تأثیر گذار بر عملکرد سیکلون‌ها را مورد مطالعه قرار داده و به این نتیجه رسیدند که ابعاد هندسی بسیار مهم هستند، زیرا مستقیما در کارایی سیکلون تأثیر دارند و اغلب در هزینه‌های عملیاتی نیز منعکس می‌شوند. به طور کلی، باید به دنبال روش‌هایی برای دست یافتن به بازده بالای جداسازی و افت‌فشار کم بود [7].

با توسعه سریع فناوری رایانه، یک روش تحقیقاتی جدید پدید آمده است که به حل مشکل جریان‌های چندفازی درون سیکلون‌ها کمک می‌کند که دینامیک سیالات محاسباتی نامیده می‌شود. بویسان و همکاران [8] اولین کسانی بودند که از دینامیک سیالات محاسباتی برای تجزیه و تحلیل جریان در یک سیکلون و محاسبه بازده جداسازی استفاده کردند. با بررسی مطالعات انجام شده در این زمینه، این نتیجه به دست می‌آید که محققان از مدل‌های عددی مختلفی استفاده کرده‌اند. برخی از محققان مثل کاراگز و همکاران [9]، لما و همکاران [10]، شین و همکاران [11] و ماتیلال و همکاران [12] در تحقیقات خود از مدل k-ε RNG برای مدل‌کردن جریان مغشوش درون سیکلون‌ها استفاده کردند. اما، مدل تنش رینولدز رایج‌ترین مدل برای جداکننده‌های سیکلون هستند [16-13]. مزیت اصلی این مدل، امکان پیش‌بینی تنش مغشوش با ویژگی بسیار ناهمسانگرد است. این مدل، در مقایسه با مدل RNG k-ε، نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد. آزادی و همکاران [17] کارایی این دو مدل را مقایسه کردند. نتایج مطالعه آن‌ها دقت بیشتر مدل تنش رینولدز در مقایسه با تحقیقات تجربی را نشان می‌دهد. برخی مطالعات این دو مدل را ترکیب می‌کنند که می‌توان به کار هوبن و پیرکر [18] اشاره کرد. در مرحله اولیه شبیه‌سازی، آن‌ها از مدل RNG k-ε برای تثبیت جریان استفاده کردند و سپس مدل تنش رینولدز را به کار گرفتند. در سال‌های اخیر، مدل موسوم به شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ در مطالعه سیکلون‌ها محبوبیت زیادی پیدا کرده است. دو نوع از این مدل وجود دارد: ۱) شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ همراه با روش حجم محدود ۲) شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ همراه با روش شبکه بولتزمن [19].

یکی از روش‌های بهینه‌سازی ساختار سیکلون، تجهیز سازه‌های رایج به یک عنصر اضافی به شکل یک مخروط در ناحیه زیرین سیکلون است. هدف عنصر اضافی (که تثبیت‌کننده ورتکس نامیده می‌شود)، محدود کردن گردش ثانویه ذرات جدا شده است [20]. بال‌استرین و همکاران [21] کاهش قطر ورتکس ثانویه را آزمایش کردند که باعث ایجاد یک چرخش رو به پایین و افزایش بازده جمع‌آوری ذرات کوچک‌تر از ۵ میکرومتر می‌شد. یوو و همکارانش [22] در آزمایش‌هایی که بر روی سیکلون‌هایی با ورودی‌های مختلف انجام دادند، کاهش قابل توجهی در افت-فشار برای غلظت ذرات در حدود ۵ گرم بر مترمکعب مشاهده

کردند. ساخت سیکلون‌ها نسبتا آسان است. با این حال، به دلیل الگوی جریان پیچیده، می‌توان چندین پدیده را در میدان‌جریان مشاهده کرد، مانند ورتکس‌های منسجم، جداشدن لایه‌های مرزی و مناطق گردش مجدد جریان، تعامل بین فازها و تلاطم شدید. همه این عوامل در طراحی اجزای سیکلون دخیل هستند. الگوی جریان در جداکننده‌های سیکلون بسته به میزان بارگذاری ذرات جامد به طور قابل توجهی تغییر می‌کند. با توجه به این موضوع، هواکسترا و همکاران [23] آزمایش‌های زیادی بر روی میزان افت فشار انجام دادند که بخشی از نتایج آن‌ها بر روی یک سیکلون استاندارد استیرمند انجام شد. هافمن و همکاران [24] گزارش دادندکه غلظت بیشتر باعث افزایش بازده جداسازی ذرات می-شود و در نتیجه دستیابی به جداسازی فازها در جریان‌های رقیق سخت‌تر است.

علاوه بر سیکلون‌های با بدنه استوانه‌ای، نوعی دیگر از سیکلون وجود دارد که به آن سیکلون مربعی گفته می‌شود. مزیت این نوع سیکلون نسبت به انواع قبلی، راحتی نصب و سهولت ساخت آن است. علاوه بر این، زمان شروع و توقف کوتاه‌تری دارد. همچنین می‌توان سطوح انتقال حرارت را بر روی دیواره-های داخلی جداساز قرار داد و در حین جداسازی عملیات خنک-کاری جریان آب یا بخار را نیز انجام داد. به طور کلی، جداکننده سیکلون مربعی دارای بازده جداسازی پایینی است. بنابراین، توسعه یک روش مؤثر برای افزایش عملکرد کلی این نوع سیکلون باید مورد توجه قرار گیرد. از میان این روش‌ها، بهینه‌سازی عملکرد سیکلون در جداسازی با اعمال میدان - الکتریکی هدف پژوهش حاضر است. در کار حاضر، یک نیروی الکترومغناطیس به بدنه سیکلون اعمال شده است. اعمال بار-الکتریکی به سیکلون مربعی توسط یک باتری لیتیوم -یونی صورت می‌پذیرد و تأثیر میدان الکتریکی بر سرعت مماسی، سرعت محوری و توزیع فشار بررسی می‌شود.

معادلات حاکم

از آنجا که سیال نیوتنی و جریان گاز در سیکلون تراکم‌ناپذیر فرض می‌شود، معادلات پیوستگی و ناویر–استوکس در حالت سه‌بعدی با متوسط‌گیری رینولدز با صرفنظر کردن از نیروی گرانش به ترتیب به شرح زیر بیان می‌شوند [1]:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} R_{ij} \qquad (۲)$$

در اینجا، $\bar{u}_i$ بردار سرعت متوسط، x_i بردار موقعیت، $\bar{P}$ فشار متوسط، ρ چگالی گاز، ν لزجت سینماتیکی گاز و R_{ij} تنسور تنش رینولدز است. پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که مدل تنش رینولدز می‌تواند برای محاسبه نرخ کرنش–تنش برای جریان پیچیده در سیکلون‌ها استفاده شود [1,5]. از این رو، این مدل برای کار حاضر انتخاب شده است. مدل تنش رینولدز معادله انتقالی را برای نرخ اتلاف ارائه می‌کند که به صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t} R_{ij} + \bar{u}_k \frac{\partial}{\partial x_k} R_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k}\left(\frac{\nu_t}{\sigma^k}\frac{\partial}{\partial x_k} R_{ij}\right) - \left[R_{ik}\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_K} + R_{jk}\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k}\right] - C_1 \frac{\varepsilon}{k}\left[R_{ij} - \frac{2}{3}\delta_{ij} k\right] - C_2\left[P_{ij} - \frac{2}{3}\delta_{ij} P\right] - \frac{2}{3}\delta_{ij}\varepsilon \qquad (۳)$$

که

$$P_{ij} = -\left[R_{ik}\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_K} + R_{jk}\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k}\right], \quad P = \frac{1}{2} P_{ij} \qquad (۴)$$

در این معادله، P تولید انرژی جنبشی نوسانی را نشان می‌دهد و ν_t لزجت سینماتیکی مغشوش است. ثابت‌های تجربی به صورت زیر تعیین شده‌اند: σ^k=۱، C_1 = ۱/۸ و C_2 = ۰/۶. معادله انتقال برای نرخ اتلاف مغشوش، ε، به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_J \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_J} = \frac{\partial}{\partial x_J}\left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma^{\varepsilon}}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_J}\right] - C^{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k} R_{ij}\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C^{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (۵)$$

که در آن k انرژی جنبشی نوسانی است. مقادیر ثابت‌ها عبارتند از: σ^{ε} = ۱/۳، $C^{\varepsilon 1}$ = ۱/۴۴ و $C^{\varepsilon 2}$ = ۱/۹۲.

همچنین، از آنجا که کسر حجمی ذرات کمتر از ۱۰ درصد است، برای ردیابی ذرات جامد از کوپلینگ یک‌راهه استفاده می-شود [1]. با توجه به رویکرد اویلری–لاگرانژی، قانون دوم نیوتن برای حرکت ذرات به شرح زیر است:

$$\frac{du_P}{dt} = F_D(u_A - u_P)_x \qquad (۶)$$

که

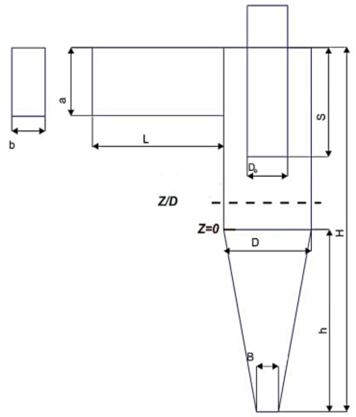
$$F_D = \frac{18\mu_A}{\rho_P d_P^2}\frac{C_D Re_P}{24} \quad (۷)$$

$$C_D = C_1 + \frac{C_2}{Re_P} + \frac{C_3}{Re_P^2} \quad (۸)$$

$$Re_P = \frac{\rho_A d_P |u_P - u_A|}{\mu_A} \quad (۹)$$

در اینجا، u_A سرعت هوا، u_P سرعت ذرات، μ_A لزجت هوا، ρ_A چگالی هوا، ρ_P چگالی ذرات جامد، d_P قطر ذرات و Re_P عدد رینولدز ذره است. C_D ضریب درگ است و ضرایب C_1، C_2 و C_3 به Re_P بستگی دارند.

کلیه گسسته‌سازی‌ها با استفاده از روش حجم محدود انجام می‌گیرد و برای کوپلینگ سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. معادلات با روش تکرار حل می‌شوند و مقادیر باقیمانده هر یک از معادلات برای اتمام روش تکرار $۱۰^{-۵}$ در نظر گرفته شده است. سیال دارای چگالی $۱/۲۲۵\ kg/m^3$ و ذرات دارای چگالی $۲۶۵۰\ kg/m^3$ هستند. بر روی دیواره‌ها شرط عدم لغزش برقرار است، سیال تراکم‌ناپذیر است و سرعت ورودی ۲۵ m/s در نظر گرفته شده است. شکل (۱) هندسه سیکلون و جدول (۱) مشخصات ابعادی را نشان می‌دهند.



شکل ۱ طرحواره سیکلون مربعی (D اندازه ضلع بدنه مربعی است)

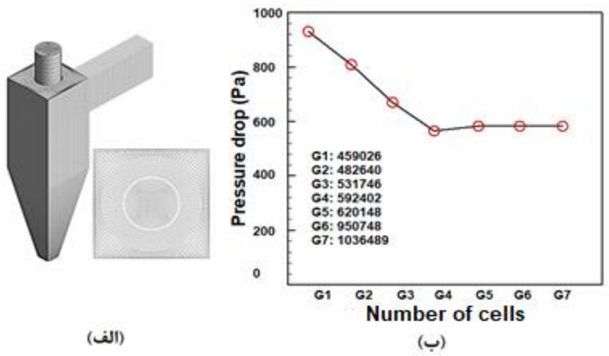
جدول ۱ ابعاد سیکلون مربعی (بر حسب میلی‌متر)

D	De	a	b	s	h	H	B	ابعاد
۱۰۰	۴۶۰	۷۵۰	۳۸۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۴۰۰۰	۲۵۰	

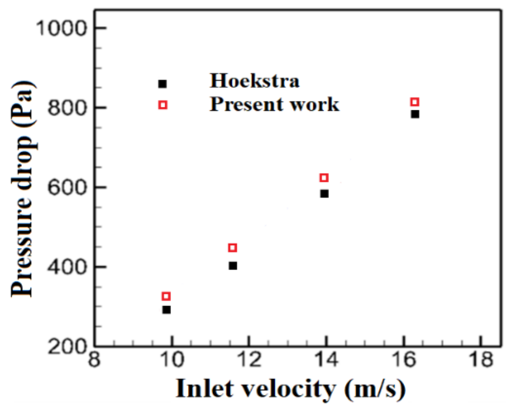
مطالعه شبکه و اعتبارسنجی

برای تعیین شبکه محاسباتی مناسب، میزان افت فشار سیکلون با هفت شبکه مختلف با ۴۵۹۰۲۶، ۴۸۲۶۴۰، ۵۳۱۷۴۶، ۵۹۲۴۰۲، ۶۲۰۱۴۸، ۹۵۰۴۷۸ و ۱۰۳۶۴۸۹ سلول محاسباتی محاسبه گردید.

شکل (۲-الف) نشان می‌دهد که افت فشار با افزایش تعداد سلول محاسباتی از ۵۹۲۴۰۲ سلول محاسباتی به بعد بسیار ناچیز است. با توجه به افزایش زمان انجام محاسبات با افزایش تعداد سلول-های محاسباتی، شبکه با ۵۹۲۴۰۲ سلول محاسباتی برای انجام شبیه‌سازی‌ها انتخاب شد. شکل (۲-ب) نمای شبکه محاسباتی تولید شده را نشان می‌دهد. همچنین، جهت اطمینان از درستی نتایج عددی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی هواکسترا [23] که سیکلون استاندارد استیرمند را مورد مطالعه قرار داده است، مقایسه می‌شود. شکل (۳) مقادیر افت فشار به دست آمده از کار حاضر در چند سرعت ورودی مختلف را با داده‌های تجربی هواکسترا [23] مقایسه کرده است و نشان می‌دهد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی تطابق مناسبی با نتایج تجربی دارد. بیشترین درصد خطا حدود ۱۰٪ است که به دلیل فرضیات ساده‌شونده عددی از جمله در نظر نگرفتن زبری سطوح و تزریق کاملا یکنواخت فاز گسسته است. همچنین، شرایط متفاوت آزمایشگاهی و نیز خطاهای اندازه‌گیری مربوط به کار تجربی نیز می‌تواند منشأ اختلاف بین نتایج باشد.



شکل ۲ مطالعه استقلال حل از شبکه: (الف) افت فشار بر حسب تعداد سلول محاسباتی و (ب) نمای شبکه محاسباتی



شکل ۳ افت فشار بر حسب سرعت ورودی: مقایسه نتایج حاضر و داده-های تجربی هواکسترا [23]

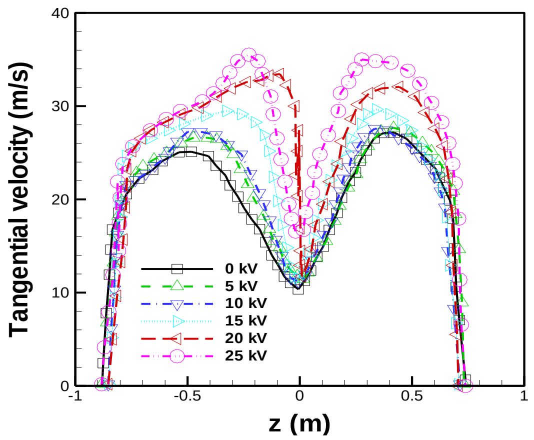
نتایج

سیکلون مربعی در دوحالت با و بدون اعمال میدان الکتریکی مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهد گرفت. یک باتری لیتیوم -یونی با ظرفیت نامی ۱/۷۵ AH و سرعت شارژ و دشارژ ۱ آمپر بر ۱ ساعت برای تولید جریان به کار گرفته می‌شود. شدت اغتشاش ۰/۰۵ و مقیاس طول آشفتگی ۰/۰۰۵۶ m با تنش رینولدز m^2/s^2 ۱/۵۶۲۵ متناظر است. ولتاژ ناشی از اعمال جریان بین ۵ تا ۱۰ کیلوولت خواهد بود. بر روی دیواره‌ها، شرط مرزی عدم لغزش برقرار است. در گوشه دیوار، از توابع استاندارد دیواره استفاده می‌شود. جریان در ناحیه مرکزی به عنوان ناحیه ورتکس اجباری و جریان نزدیک دیوار به عنوان ناحیه ورتکس شبه‌آزاد در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، جریان چرخشی مغشوش در داخل سیکلون مربعی دارای ویژگی‌های گردابه رانکین است. زمانی که سرعت مماسی با دور شدن از دیواره‌ها افزایش می‌یابد گردابه اجباری به وجود می‌آورد. پس از رسیدن به مقدار حداکثر خود رو به کاهش می‌رود و گردابه آزاد را شکل می‌دهد. به ترکیب گردابه اجباری و گردابه آزاد، گردابه رانکین گفته می‌شود.

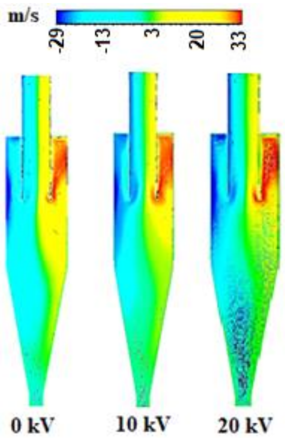
سرعت مماسی

سرعت مماسی مهم‌ترین مؤلفه سرعت در جداکننده‌های سیکلون است که هم بر افت فشار و هم بر بازده جداسازی تأثیر می‌گذارد. جداسازی ذرات جامد در اثر نیروی گریز از مرکز صورت می-گیرد و این نیرو مستقیما با اندازه سرعت مماسی مرتبط است. پروفیل سرعت مماسی از دو ناحیه داخلی و خارجی تشکیل می-شود. در ناحیه داخلی که تقریبا چرخشی است شبیه دوران جسم جامد عمل می‌کند که به آن ورتکس اجباری گفته می‌شود. شکل (۴) تأثیر میدان الکتریکی بر سرعت مماسی نشان می‌دهد. در این شکل، سرعت ورودی ۲۵ m/s و مقدار ولتاژ از صفر تا ۲۵ کیلوولت متغیر است.

هدف از اعمال میدان الکتریکی به بدنه سیکلون، افزایش نیروی گریز از مرکز است. با افزایش مقدار سرعت مماسی از محور سیکلون، نیروی گریز از مرکز افزایش یافته و موجب بازده جداسازی بیشتر در سیکلون می‌شود. شکل (۴) دو مطلب مهم را آشکار می‌سازد: با افزایش ولتاژ، مقدار ماکزیمم سرعت مماسی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، قطر هسته ورتکس داخلی با افزایش قدرت میدان الکتریکی کوچکتر می‌شود. این دو مهم موجب پایداری بیشتر ورتکس داخلی خواهد شد. کاهش قطر ورتکس داخلی و افزایش قابل توجه مؤلفه مماسی سرعت موجب افزایش بازده جداسازی ذرات می‌شود. نکته دیگر، عدم تقارت توزیع سرعت مماسی با اعمال نیروی الکتریکی است. در نواحی دور از مرکز، رفتار جریان شبیه به ورتکس آزاد است و با افزایش نیروی الکتریکی، قطر ورتکس اجباری کمتر می‌شود. کانتورهای ارائه شده در شکل (۵) به خوبی مطالب ذکر شده را تأیید می‌کند.



شکل ۴ تأثیر میدان الکتریکی بر اندازه سرعت مماسی

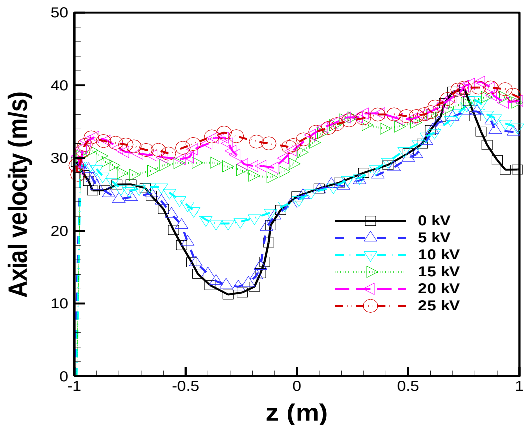


شکل ۵ کانتور سرعت مماسی بر حسب ولتاژهای مختلف

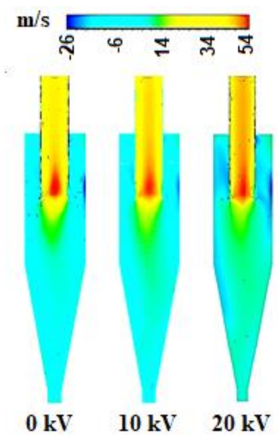
سرعت محوری

یکی دیگر از مؤلفه‌های مهم سرعت که وظیفه حمل ذرات جامد را بر عهده دارد، سرعت محوری است. سرعت محوری در نزدیکی خط مرکزی در ناحیه ورتکس اجباری افزایش می‌یابد. این مؤلفه سرعت در ناحیه ورتکس آزاد به کمترین مقدار ممکن می‌رسد. همچنین، با در نظر گرفتن اثرات انعکاسی دیواره، اندازه سرعت محوری ناحیه هسته داخلی کاهش می‌یابد. در نزدیکی دیواره سیکلون، سرعت محوری ذرات را به سمت پایین (قسمت مخروطی و سپس محل جمع‌آوری) منتقل می‌کند. در ناحیه نزدیک دیواره، جریان رو به سمت پایین است که ذرات را با خود

حمل می‌کند. در ناحیه ورتکس داخلی، جریان سیال بدون ذره و یا با ذرات کوچک به سمت بالا و به سمت ورتکس‌یاب هدایت می‌شود. افزایش ولتاژ باعث افزایش قابل توجهی در سرعت محوری می‌شود (شکل ۶). کانتورهای رسم شده در شکل (۷) ماکزیمم و مینی‌مم محلی را در ناحیه نزدیک دیوار در دو طرف محور نشان می‌دهد و پس از آن، به دلیل اثرات میرایی در ناحیه لایه مرزی، بزرگی آن به شدت کاهش می‌یابد. شکل‌های فوق نشان می‌دهند که با افزایش ولتاژ، مقدار سرعت محوری در ناحیه دور از محور بیشتر شده که موجب افزایش حرکت ذرات به سمت پایین و در نتیجه، افزایش بازده جداسازی می‌شود. همچنین، افزایش سرعت در ناحیه ورتکس داخلی، سرعت خروج هوای پاکیزه بیشتر شده است.



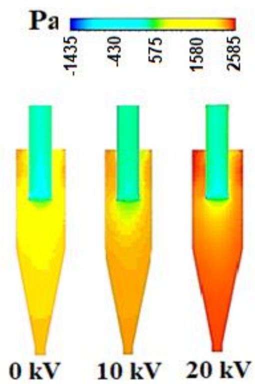
شکل ۶ تأثیر میدان الکتریکی بر اندازه سرعت محوری



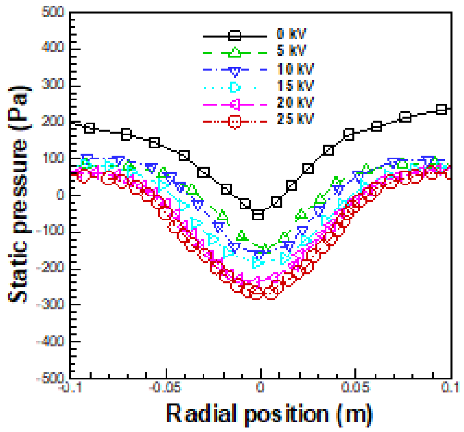
شکل ۷ کانتور سرعت محوری بر حسب ولتاژهای مختلف

افت فشار

در این بخش، به اثر اعمال میدان الکتریکی بر توزیع فشار درون سیکلون پرداخته می‌شود در حالتی که سرعت ورودی برابر همان ۲۵ m/s است. با محاسبه فشار می‌توان افت فشار سیکلون را به دست آورد. افت فشار یک پارامتر کلیدی برای جداکننده‌های سیکلون است که در ارتباط با کارایی مجموعه، اثربخشی و سودآوری آن را نشان می‌دهد. مبنای تعیین افت فشار برای سیکلون‌های مورد بررسی، توزیع فشار کل است که در کانتورهای شکل (۸) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که فشار کل و توزیع آن به جریان ورتکس‌یاب بستگی دارد. در همه حالت‌ها، بیشترین فشار در بالای جداکننده و کمترین فشار در ناحیه نزدیک به محور سیکلون رخ می‌دهد. افت فشاردر سیکلون در نتیجه اصطکاک فاز پیوسته و گسسته با دیواره‌ها و اختلاط جریان در درون سیکلون است. در اغلب موارد، کاهش افت فشار، کاهش بازده جداسازی سیکلون را به دنبال خواهد داشت. تفاوت فشاراستاتیک در ورودی و خروجی سیکلون به عنوان افت فشار تعریف می‌شود که می‌تواند اتلاف انرژی سیکلون را اندازه‌گیری کند. واضح است که افت فشار با افزایش سرعت ورودی به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. نیروی الکتریکی باعث می‌شود افت‌فشار ناشی از عبور جریان سیال از این دستگاه در مقایسه با حالت بدون الکتریکی به مراتب کمتر شود. در نتیجه، سیکلون مربعی قادر خواهد بود گستره وسیعی از ذرات را با بازده بالا و افت فشار کم جدا نماید. مشاهده می‌شود که سیکلون مربعی بدون اعمال میدان الکتریکی حداکثر افت فشار را ایجاد می‌کند. با افزایش ولتاژ، افت فشار کاهش می‌یابد. نتایج افزایش فشار را می‌توان با کاهش اصطکاک دیواره در سیکلون مشاهده کرد، زیرا گرد و غبار کمتری از محفظه پایینی سیکلون به بدنه اصلی سیکلون برخورد می‌کند. شکل (۹) به طور کمی نشان می‌دهد که بیشترین افت فشار در ولتاژ صفر و کمترین افت فشار در ولتاژ ۲۵ ولت اتفاق می‌افتد.



شکل ۸ کانتور فشار استاتیک بر حسب ولتاژهای مختلف



شکل ۹ تأثیر میدان الکتریکی بر فشار استاتیک

نتیجه‌گیری

هدف از مطالعه حاضر بررسی عددی اثر میدان الکتریکی بر بهبود کارایی یک سیکلون مربعی است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از روش اویلری–لاگرانژی و کوپلینگ تک‌راهه انجام گردید و اثر ولتاژ بر دو مؤلفه سرعت، یعنی سرعت مماسی و سرعت محوری، و نیز افت فشار بررسی گردید. نتایج نشان دادند که افزایش ولتاژ اعمالی باعث افزایش سرعت مماسی می‌شود. ازدیاد نیروی گریز از مرکز حاصل از افزایش سرعت مماسی، ذره را به سمت دیواره مخروطی حرکت داده و غلظت ذرات را در این نواحی افزایش می‌دهد. در نتیجه، تجمع ذرات در بخش زیرین سیکلون بیشتر شده که منجر به افزایش بازده جدایش ذرات می‌گردد. نیروی الکتریکی بر رفتار ذرات در داخل سیکلون تأثیر می‌گذارد و منجر به تغییر در دینامیک سیال و مسیر ذرات می‌شود. دلیل افزایش سرعت مماسی را می‌توان چنین توضیح داد: نیروی الکتریکی به عنوان یک نیروی محرک اضافی عمل می‌کند، ذرات را شتاب می‌دهد و حرکت چرخشی آن‌ها را افزایش می‌دهد. از سوی دیگر، سرعت محوری به سرعت ذرات در جهت موازی با محور سیکلون اشاره دارد. بر اساس نتایج، اعمال نیروی الکتریکی می‌تواند سرعت محوری را نیز افزایش دهد چرا که نیروی الکتریکی جریان سیال را افزایش می‌دهد و تلاطم اضافی ایجاد می‌کند که منجر به سرعت‌های بالاتر در جهت محوری می‌شود. نتایج نشان دادند که اعمال نیروی الکتریکی می‌تواند افت فشار را کاهش دهد چرا که افزایش نیروی الکتریکی باعث افزایش میزان ذرات جامد حمل شده توسط گاز و در نتیجه کاهش افت فشار می‌شود. همچنین، می‌توان از شبکه عصبی جهت بهینه‌سازی [25]، اعمال میدان گرما [26]، شبیه‌سازی در ابعاد میکرو [27] و نیز ترکیب دستگاه‌های میکروفلوئیدیکی [28] با سیکلون در کارهای آتی استفاده کرد.

واژه‌نامه

گردابه‌یاب	Vortex finder
یک‌راهه	One-way
کوپلینگ	Coupling
مدل تنش رینولدز	Reynolds stress model
اویلری–لاگرانژی	Eulerian-Lagrangian
سیکلون مربعی	Square cyclone
گردابه رانکین	Rankine vortex
فاز گسسته	Discrete phase
فاز پیوسته	Continuous phase

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] E. Dehdarinejad, M. Bayareh, “An overview of numerical simulations on gas-solid cyclone separators with tangential inlet,” *ChemBioEng Reviews.* vol. 8, no. 4, pp. 375-391, 2021. https://doi.org/10.1002/cben.202000034.

[2] E. Dehdarinejad, M. Bayareh, M. Ashrafizaadeh, “Impact of cone wall roughness on turbulence swirling flow in a cyclone separator,” *Chemical Papers*, vol. 76, pp. 5579–5599, 2022. https://doi.org/10.1007/s11696-022-02261-6.

[3] A. C. Hoffmann, R. De Jonge, H. Arends, C. Hanrats, “Evidence of the ‘natural vortex length’ and its effect on the separation efficiency of gas cyclones,” *Filtration & Separation*, vol. 32, no. 8, pp. 799–804,1995. https://doi.org/10.1016/S0015-1882(97)84131-6.

[4] Y. Chen, M. Nieskens, R. Karri, T. M. Knowlton, “Developments in cyclone technology improve FCC unit reliability,” *Petroleum Technology Quarterly*, vol. 15, no. 3, pp. 65–71, 2010.

[5] A. Avci, I. Karagoz, A. Surmen, “Development of a new method for evaluating vortex length in reversed flow cyclone separators,” *Powder Technology*, vol. 235, pp. 460–466, 2013.

[6] L. K. Wang, N. C. Pereira, Y. T. Hung, Air Pollution Control Engineering, Totowa, New Jersey, USA, 2004.

[5] L. Svarovsky, Hydrocyclones Holt, Rinehart and Winston East Sussex, “Beneficiation of White Kaolinitic Sandstone to Produce Kaolin Concentrate from Wadi Siq-Rakyia Area in Wadi Araba, Jordan,” *Open Journal of Geology*, vol.10, no. 8, 2020.

[7] F. Boysan, W. H. Ayer, J. Swithenbank, “Fundamental mathematical-modelling approach to cyclone design,” *Transactions of the Institution of Chemical Engineers.* vol. 60, no. 4, pp. 222–230, 1982.

[8] I. Karagoz, F. Kaya, “CFD investigation of the flow and heat transfer characteristics in a tangential inlet cyclone,” *International Journal of Heat and Mass Transfer.* vol. 34, pp. 1119–1126, 2007. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.05.017.

[9] L. Ma, D. B. Ingham, X. Wen, “Numerical modeling of the fluid and particle penetration through small sampling cyclones,” *Journal of Aerosol Science*, vol. 31, no. 9, pp. 1097–1119, 2000. https://doi.org/10.1016/S0021-8502(00)00016-1.

[10] M. S. Shin, H. S. Kim, D. S. Jang, J. D. Chung, M. Bohnet, “A numerical and experimental study on a high efficiency cyclone dust separator for high temperature and pressurized environments,” *Applied Thermal Engineering.*, vol. 25, no. 11-12, pp. 1821–1835, 2005. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.11.002.

[11] T. Mothilal, K. Pitchandi, “Influence of inlet velocity of air and solid particle feed rateon holdup mass and heat transfer characteristics in cyclone heat exchanger,” *Journal of Mechanical Science and Technology.*, vol. 29, 4509-4518, 2015. https://doi.org/10.1007/s12206-015-0950-z.

[12] J. Gimbun, T. G. Chuah, T. S. Y. Choong, A. Fakhru’l-Razi, “Prediction of the effects of cone tip diameter on the cyclone,” *Journal of Aerosol Science.*, vol. 36, no. 8, pp. 1056–1065, 2005. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2004.10.014.

[13] B. Zhao, Y. Su, J. Zhang, “Simulation of gas flow pattern and separation efficiency in cyclone with conventional single and spiral double inlet configuration,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 84, no. 12, pp. 1158–1165, 2006. https://doi.org/10.1205/cherd06040.

[14] K. W. Chu, B. Wang, A. Vince, A. B. Yu, G. D. Barnett, P. J. Barnett, “CFD-DEM study of the effect of particle density distribution on the multiphase flow and performance of dense medium cyclone,” *Minerals Engineering*, vol. 22, no. 11, pp. 893–909, 2009. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.04.008.

[15] K. W. Chu, B. Wang, A. B. Yu, A. Vince, “CFD-DEM modelling of multiphase flow in dense medium cyclones,” *Powder Technolgi*, vol. 193, no. 3, pp. 235–247, 2009. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.03.015.

[16] K. Elsayed, C. Lacor, “Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical models and CFD simulations,” *Chemical Engineering., Sci*, vol. 65, no. 22, pp. 6048–6058, 2010. https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.08.042.

[17] M. Azadi, M. Azadi, A. Mohebbi, "A CFD study of the effect of cyclone size on its performance parameters," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 182, no. 1-3, pp. 835–841, 2010. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.115.

[18] J. J. H. Houben, S. Pirker, "CFD Simulations of Pressure Drop and Velocity Field in a Cyclone Separator with Central Vortex Stabilization Rod," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 9, no. 1, pp. 487-499, 2016. https://doi.org/10.18869/acadpub.jafm.68.224.23934.

[19] S. G. Bogodage, A. Y. T. Leung, "CFD simulation of cyclone separators to reduce air pollution," *Powder Technol*, vol. 286, pp. 488–506, 2015. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.08.023.

[20] E. Muschelknautz, V. Greif, "Cyclones and Other Gas–Solids Separators, Circulating Fluidized Beds," *Blackie Academic & Professional*, 1997. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0095-0_6.

[21] E. Balestrin, R.K. Decker, D. Noriler, J.C.S.C. Bastos, H.F. Meier, "An alternative for the collection of small particles in cyclones: experimental analysis and CFD modeling," *Separation and Purification Technology*, vol. 184, p. 5465, 2017. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.04.023.

[22] S. Yuu, T. Jotaki, K. Yoshida, "The reduction of pressure drop due to dust loading in a conventional cyclone," *Chemical Engineering Science*, vol. 33, no. 12, pp. 1573–1580, 1978. https://doi.org/10.1016/0009-2509(78)85132-X.

[23] A. J. Hoekstra, "Gas Flow Field and Collection Efficiency of Cyclone Separators," Ph.D.thesis, Technical University Delft, 2000.

[24] A. C. Hoffmann, A. Santen, R.W.K. van Allen, "Effects of geometry and solid load in on the performance of gas cyclones," *Powder Technology*. vol. 70, no. 1, pp. 83–91, 1992. https://doi.org/10.1016/0032-5910(92)85058-4.

[25] M. Zamani Mohiabadi, F. Soltani, A. Borumandpour, Q. Sheikhzadeh, "Prediction of flow in two-dimensional asymmetric diffuser by neural network and comparison of results with three turbulence models and experimental data," *Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 34, no. 2, pp. 45-60, 2022. https://doi.org/10.22067/jacsm.2022.74041.1076.

[26] A. Jahanbakhshi, A. Ahmadi Nadushan, M. Bayareh, "Effect of adding microtube on thermal and hydrodynamic behavior of a heatsink microchannel for nanofluid flow," *Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 34, no. 1, pp. 21-36, 2022. 10.22067/jacsm.2022.75344.1100.

[27] A. Jahanbakhshi, A. Ahmadi Nadushan, D. Bahrami, M. Bayareh, "Numerical investigation of forced displacement in a microchannel Numerical investigation of forced convection in a microchannel in the presence of the slip condition and nanofluid," *Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 34, no. 4, pp. 53-64, 2022. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.07.020.

[28] A. Nabi Far Khafri, M. Bayareh, "Numerical simulation of a micropump based on piezoelectric actuator. Applied and computational sciences in mechanics," *Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 36, no. 3, pp. 1-14, 2024. 10.22067/jacsm.2024.80610.1158.